



**CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'APPLICATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE
DANS L'INTÉRÊT DES RÉGIONS PEU DÉVELOPPÉES**

E/CONF.39/A/57

2 Oct.1962

ORIGINAL : FRANCAIS

Point de l'ordre du jour : A.4.3.3

France

**ASPECTS ECONOMIQUES DE L'UTILISATION
DES RESSOURCES HYDROELECTRIQUES**

Par Marcel MARY,
Contrôleur général
de l'Equipement à l'Electricité de France

Les mémoires rédigés à l'intention de la Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées sont des documents de travail. Ils sont publiés tels qu'ils ont été présentés et les assertions et opinions qu'ils contiennent sont celles de leurs auteurs.

NOTES

1. Les mémoires choisis pour être présentés en séance générale pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

2. Les mémoires choisis pour être présentés en séance spéciale pourront être obtenus à la Conférence dans l'une seulement de ces langues officielles.

3. Les résumés qui ont été rédigés pour tous les mémoires par les auteurs de ceux-ci pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

4. Préalablement à la Conférence, les mémoires et les résumés ne feront pas l'objet d'une distribution générale mais d'un tirage restreint destiné aux délégations des gouvernements et autres participants officiels. La publication et la distribution générale des actes de la Conférence s'effectueront conformément aux règles et pratiques agréées par le Comité des publications des Nations Unies.

ASPECTS ECONOMIQUES DE L'UTILISATION DES
RESSOURCES HYDROELECTRIQUES

A.4.3.3.

par Marcel MARY Contrôleur Général de l'Equipe-
ment à Electricité de France

1 - Introduction

1-a) Le présent rapport a pour objet de résumer un certain nombre de considérations de nature à faciliter le choix des aménagements hydroélectriques à incorporer dans les Plans de développement et à orienter l'économiste dans la détermination des caractéristiques fondamentales de chacun de ces aménagements.

1-b) Ces réflexions sont le fruit d'une expérience de plusieurs années acquise par l'auteur à l'occasion de l'établissement de Plans Généraux d'Electrification demandés à Electricité de France par divers pays en voie de développement.

1-c) Le problème se présente de la manière suivante : Le prospecteur est supposé avoir déterminé, par un découpage judicieux du cours des rivières, établi de manière à permettre progressivement une utilisation rationnelle des puissances naturelles, un certain nombre de sites qui lui paraissent économiquement utilisables, c'est-à-dire qu'il a retenu des schémas comportant chacun l'emplacement du barrage et de la centrale. Il lui reste à déterminer la hauteur optima à donner au barrage et la puissance optima à donner à la centrale, à calculer la valeur économique des diverses variantes possibles, et à comparer les projets entre eux de manière à les inscrire dans le Plan de développement dans l'ordre le plus favorable à l'intérêt national.

1-d) Il serait naturellement souhaitable que la prospection complète du pays précédât ce choix, mais pratiquement ce désir est irréalisable, car dans la plupart des cas, les données topographiques, hydrologiques et géologiques sont insuffisantes. Il faut donc se contenter de comparer les projets les mieux connus, sous peine de retarder indéfiniment les décisions. L'attention des Gouvernements est, à cette occasion, attirée sur la nécessité de pousser activement la prospection pour accroître dans l'avenir le nombre des choix possibles.

2 - Valeur économique

2-a) Une centrale thermique est capable d'assurer, dans la limite de sa puissance installée, les fournitures en énergie d'un diagramme de charge de forme quelconque. Il est donc naturel de prendre comme terme de comparaison une telle centrale.

2-b) Une centrale hydroélectrique est limitée, non seulement par sa

puissance installée, mais également par le débit susceptible d'être turbiné à chaque instant. Elle est caractérisée par sa puissance garantie et par sa production annuelle moyenne.

2-c) La comparaison sera donc faite entre cette centrale et la puissance thermique équivalente sous ces deux aspects.

2-d) La méthode utilisée par Electricité de France et préconisée par l'auteur pour tous les pays consiste à calculer pour chacun des termes de comparaison le capital fictif qu'il serait théoriquement nécessaire de constituer à l'époque de la construction pour réaliser les ouvrages, les faire vivre et les renouveler indéfiniment. La comparaison de ces coûts fictifs totaux permet d'apprécier les valeurs économiques des projets et variantes étudiés.

2-e) Le calcul du taux de rentabilité, c'est-à-dire du revenu annuel de la différence des investissements entre hydraulique et thermique permet d'autre part de juger si les sommes investies dans l'hydraulique ont un rendement convenable par rapport aux investissements auxquels le pays pourrait procéder dans des branches d'activité autres que l'électricité, cette comparaison étant imposée par la limitation inévitable des sommes consacrées à l'ensemble de l'expansion économique.

3 - Mécanisme de l'interconnexion

3-a) Si l'on veut assurer le service d'un secteur à l'aide d'énergie hydroélectrique pure, il faut disposer de réservoirs saisonniers de grande capacité ou se résigner à n'utiliser qu'une fraction des eaux disponibles.

3-b) On en vient donc, dans la généralité des cas, à envisager des complexes interconnectés comprenant des centrales hydroélectriques et des centrales thermiques. Cette association présente des avantages considérables.

3-c) Dans le cas très fréquent où la centrale hydroélectrique peut concentrer sa production journalière sur un petit nombre d'heures, elle assure le service de pointe du réseau en période sèche, et le service de base en période humide. Le complément est assuré par la puissance thermique associée.

3-d) Il en résulte que, tout en disposant chaque jour de l'année, à l'heure de la pointe, de la totalité de la puissance installée (hydraulique plus thermique associée), les fournitures demandées à la centrale hydroélectrique peuvent varier d'un jour à l'autre dans des limites très importantes, et d'autant plus importantes que le pourcentage de puissance thermique associé est plus grand.

3-e) Pour avoir une vue claire de ces possibilités, il suffit de tracer un graphique comprenant deux courbes déduites de la courbe de charge journalière et représentant respectivement, en fonction du rapport $\frac{P_H}{P_H + P_T} = x$ les fractions, par rapport à l'énergie totale journalière demandée, de l'énergie de pointe et de l'énergie de base du diagramme de charge à desservir. Soient y_1 et y_2 ces

courbes. On trace aussi la courbe $\frac{Y_2}{Y_1}$.

3-f) Un tel graphique montre que, sous réserve d'associer à la puissance hydroélectrique une puissance thermique convenable, toute puissance hydroélectrique, aussi capricieuse que soit la rivière, est une puissance garantie. A titre d'exemple, si la puissance thermique est égale à la puissance hydroélectrique, le rapport des consommations extrêmes d'eau s'établit à la valeur de 3,5 pour un réseau ayant 5 000 heures d'utilisation.

3-g) On voit, à titre d'exemple, l'intérêt considérable que présente une telle coordination dans le cas d'une centrale située au pied d'un barrage de régularisation annuelle. Dans ce cas, le mot de régularisation n'a plus le sens étroit qu'on doit lui donner dans un régime hydraulique pur, c'est-à-dire l'obtention d'un débit journalier constant tout au long des années d'exploitation ; il a le sens d'une simple réduction de la variation des débits naturels compatible avec la grandeur de la puissance thermique associée. La capacité utilisée est alors fortement réduite. La hauteur du barrage peut être plus faible. Si la hauteur du barrage est donnée, la tranche d'eau utilisée est réduite et la puissance garantie de la centrale, qui est calculée sous la hauteur de chute minima, est augmentée.

3-h) L'analyse détaillée de ces mécanismes permet, par des raisonnements simples, de réduire d'une manière importante, le nombre des variantes que le projeteur sera amené à étudier dans chaque cas particulier en vue du calcul de la valeur économique des projets.

3-i) Les exemples qui suivent illustrent cette proposition, et montrent le cheminement des raisonnements.

4 - Détermination des caractéristiques d'un aménagement de haute chute

4-a) Le cas élémentaire étudié concerne la détermination des caractéristiques d'un aménagement hydroélectrique unique dans lequel la hauteur de chute est grande par rapport à la hauteur du barrage, et peut par conséquent être considérée comme constante. La puissance est proportionnelle au débit.

4-b) Cet aménagement est supposé devoir être dimensionné de manière à assurer en association avec une puissance thermique convenablement calculée, le service d'un diagramme de charge de même forme que le diagramme de charge de l'ensemble du réseau, la puissance totale de l'ensemble associé étant utilisée à l'heure de la pointe.

4-c) Une recherche sans idée directrice consisterait à faire varier les trois grandeurs à préciser : hauteur du barrage, puissance à installer, puissance thermique à associer et à calculer dans chaque cas la valeur économique en vue de la recherche de l'optimum.

4-d) L'analyse du fonctionnement en régime interconnecté montre que ces trois paramètres se réduisent à un seul pour toutes les solutions dans lesquelles on cherche à utiliser l'eau au maximum, sans pertes notables par déversements.

4-e) Pour une hauteur donnée du barrage, prise comme paramètre unique, c'est-à-dire pour une courbe donnée de capacité, on peut aisément déterminer par un examen des courbes des débits, le débit minimum journalier Q_m sur lequel on peut compter en ajoutant au débit d'étiage la vidange du réservoir et la valeur Q_m du débit qu'il y a lieu d'utiliser en hautes eaux pour éviter les déversements compte tenu des quantités d'eau à réserver pour le remplissage de la réserve.

4-f) Le rapport $\frac{Q_m}{Q_H}$ est une mesure de l'irrégularité de la rivière compte tenu du jeu du réservoir. Le graphique cité en 3-e) donne par lecture directe la valeur du rapport $\frac{P_H}{P_F + T}$ correspondant à cette irrégularité d'où $\frac{P_T}{P_H}$, proportion de puissance thermique à associer.

4-f)i) La proportion de thermique associé dépend donc uniquement de la hauteur du barrage.

4-g) En écrivant d'autre part que la quantité d'eau dont on dispose en étiage correspond à celle qui est nécessaire pour satisfaire les fournitures de pointe, et en hautes eaux pour satisfaire les fourniture de base, on en déduit la valeur Q du débit à équiper.

4-g)i) Sans entrer dans le détail des démonstrations, on trouve les relations suivantes, pour un réseau de 5 000 heures :

$$\frac{Q}{Q_m} = 1,75 \frac{x}{y_1} \quad \frac{Q}{Q_m} = 1,75 \frac{x}{y_2} \quad (1,75 = \frac{8\,760}{5\,000})$$

4-g)ii) Il se trouve que la valeur de Q est pratiquement indépendante de la hauteur du barrage et égale à 1,75 fois le module. Ceci provient du fait que la centrale, qui fonctionne un nombre d'heures variable suivant les époques de l'année, a, de toutes manières, au total, un nombre d'heures de fonctionnement sensiblement égal à l'utilisation du réseau.

4-g)iii) La puissance de la centrale hydroélectrique est donc déterminée, et la grandeur de la puissance thermique à associer est une fonction directe de la hauteur du barrage.

4-h) La méthode d'approche est donc extrêmement simple : En faisant trois ou quatre hypothèses pour la hauteur du barrage, on déterminera pour chacune d'elles toutes les caractéristiques d'un complexe élémentaire hydraulique-thermique assurant le service d'un diagramme de charge semblable à celui du réseau et dans lequel la totalité de la puissance installée est une puissance garantie.

4 h)i) Il suffira de calculer les valeurs économiques de ces trois ou quatre complexes pour choisir le meilleur.

4-i) Il se peut que la puissance thermique existe déjà sur le réseau ou au contraire qu'il soit nécessaire de la créer. Dans le premier cas, les frais de premier établissement de la puissance thermique ne sont pas à prendre en compte dans le calcul économique, mais uniquement ses frais de fonctionnement et de renouvellement.

5 - Développement des raisonnements

5-a) Sans entrer dans le détail des démonstrations, on indiquera ci-après, à titre d'exemples, un certain nombre de propositions

déduites des considérations qui précèdent.

5-b) 1^e Proposition Il peut arriver que la solution étudiée ci-dessus conduise à un barrage de taille excessive, incompatible avec les données topographiques locales, ou à une proportion de puissance thermique trop importante. On recherchera alors des solutions n'utilisant l'eau que partiellement. Les calculs sont conduits de la même manière, en diminuant simplement la valeur de Q_M . Mais dans ce cas la valeur de Q n'est plus une constante, car le nombre d'heures de fonctionnement annuel augmente lorsque Q_M diminue.

5-c) 2^e Proposition Le réseau n'est pas alimenté par une seule centrale hydroélectrique, mais par un nombre plus ou moins important de centrales. L'étude combinée de cet ensemble se présente différemment suivant que les régimes des rivières sont concordants (étiages simultanés et hautes eaux simultanées) ou au contraire discordants. Le premier cas est fréquent dans les pays tropicaux, exception faite des interventions provoquées par les barrages d'irrigation.

5-c)i) Dans le cas de régimes concordants, le réseau sera constitué par la juxtaposition de complexes élémentaires hydraulique-thermique tels que celui qui a été défini au § 4. La puissance thermique nécessaire pour régulariser l'ensemble s'obtient par addition des puissances thermiques calculées pour chacun des complexes élémentaires.

5-c)ii) Dans le cas de régimes discordants, on calculera la puissance thermique nécessaire pour compenser les irrégularités de l'ensemble de la production hydraulique avant et après introduction de la centrale nouvelle. Par différence, on aura la puissance thermique à associer à cette nouvelle centrale.

5-d) 3^e Proposition Lorsque la hauteur de chute est variable (centrale de pied de barrage) le nombre de cas à examiner augmente, car un paramètre nouveau s'est introduit. La puissance garantie correspond en effet au niveau minimum du plan d'eau du lac. Mais les principes du calcul restent les mêmes.

5-e) 4^e Proposition Un Plan s'établit à partir d'une situation existante. La première recherche à effectuer consistera à déterminer si le réseau est constitué de telle sorte que la proportion de puissance thermique correspond à ce qui est nécessaire et suffisant pour que la totalité de la puissance hydraulique soit garantie, ou au contraire, si elle est insuffisante ou surabondante.

5-e)i) On examinera ensuite s'il est rentable de rétablir l'équilibre par la construction de centrales hydroélectriques ou l'introduction de puissance thermique. De toutes manières, l'introduction d'une centrale supplémentaire s'accompagnera du calcul de la puissance garantie nouvelle et le gain sera porté au crédit de cette réalisation, dans l'ordre historique. La valeur économique de chaque aménagement dépend donc de l'ordre des réalisations.

5-e)ii) Dans tout ce qui précède, il n'a été question que des centrales d'éclusées ou de lac. L'ensemble des centrales au fil de l'eau sera compté pour sa puissance garantie en étiage et porté en base de diagramme ; les autres calculs seront effectués sur le diagramme ainsi amputé par sa base.

5-f) 5^e Proposition Un suréquipement par rapport à la valeur $Q =$

1,75 M n'est généralement rentable que s'il y a surabondance de puissance thermique par rapport à l'optimum défini au § 4. Il n'a pas de raison d'être si le réseau est constamment maintenu dans un bon équilibre hydraulique-thermique.

5-g) 6^e Proposition Les calculs devront être effectués en tenant compte des variations dans l'avenir du nombre d'heures d'utilisation du réseau, car la proportion de thermique augmente avec ce nombre d'heures.

5-h) 7^e Proposition Contrairement à une opinion fréquemment émise, il n'y a pas d'incompatibilité entre l'utilisation d'un réservoir pour l'irrigation et son utilisation énergétique, comportant la garantie de puissance de la centrale de pied. Il y a seulement nécessité d'un arbitrage, le plan d'eau ne devant jamais descendre trop bas et le débit d'ailleurs faible nécessaire au service de pointe devant être turbiné à l'époque où l'irrigant n'a pas besoin d'eau. Dans la plupart des cas, la lenteur de la progression des périmètres irrigués donne d'ailleurs une liberté complète à l'électricien pendant de nombreuses années.

5-i) Les applications de la méthode proposée peuvent être étendues à de très nombreux cas. Les propositions émises ci-dessus ne sont que des exemples de la fertilité de cette méthode.

6 - Conclusion

6-a) Les considérations de la présente note n'ont pas la prétention de résoudre automatiquement les problèmes posés par l'établissement d'un Plan de développement de l'électricité, mais elles peuvent être d'une grande utilité, dans leur simplicité, pour les économistes chargés de se pencher sur ces questions.

6-b) L'essentiel de la méthode consiste à associer à chaque aménagement hydroélectrique nouveau une puissance thermique convenable de telle sorte que, à chaque étape du Plan, la totalité de la puissance installée soit nécessaire et suffisante à l'heure de la pointe (à l'exception naturellement des puissances tenues en réserve pour l'entretien et les incidents et à l'exception de la puissance des centrales au fil de l'eau).

6-c) Le manque de fonds disponibles peut amener à construire des centrales thermiques plus rapidement que ne le nécessiterait le programme le plus favorable à long terme. Mais ces puissances thermiques excédentaires seront utilisées avec profit dans les phases ultérieures de l'aménagement hydroélectrique.